



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



Veröffentlichungsnummer: **0 461 442 A2**

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

Anmeldenummer: **91108372.3**

Int. Cl.⁵: **H01J 37/28, H01J 37/04,
H01J 37/12**

Anmeldetag: **23.05.91**

Priorität: **11.06.90 DE 4018690**

Veröffentlichungstag der Anmeldung:
18.12.91 Patentblatt 91/51

Benannte Vertragsstaaten:
DE FR GB IT NL

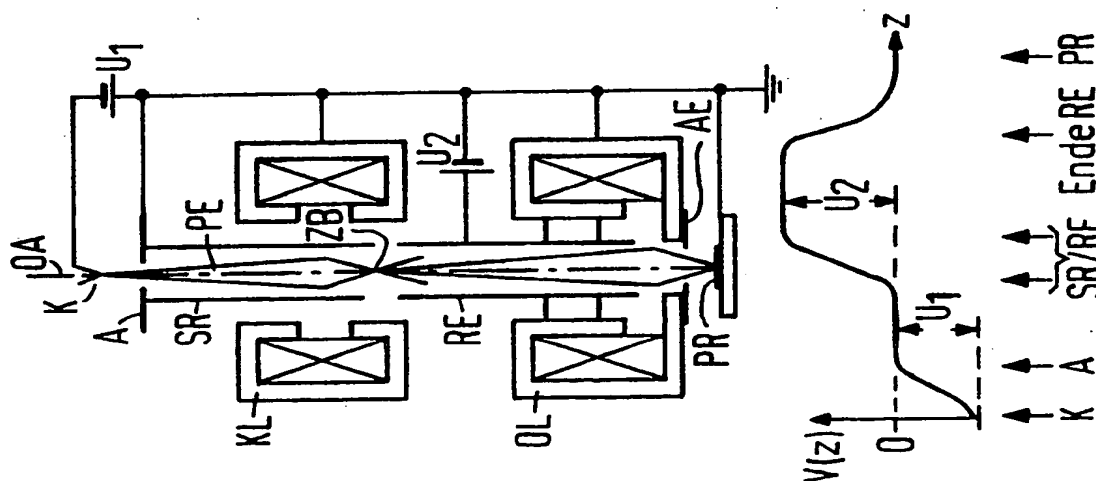
Anmelder: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**
Wittelsbacherplatz 2
W-8000 München 2(DE)

Erfinder: **Piles, Erich, Dr. rer. nat.**
Firlestrasse 15
W-8000 München 83(DE)

Teilchenstrahlgerät

Zur Verbesserung der Ortsauflösung eines konventionellen Rasterelektronenmikroskops bei niedrigen Elektronenenergien und ausreichend großen Arbeitsabständen wird vorgeschlagen, eine elektrostatische Immersionslinse im Bereich des von der Kondensoreinheit (KL) erzeugten Zwischenbildes (ZB) anzuordnen. Die Immersionslinse besteht aus dem auf Anodenpotential liegenden Strahlführungsrohr (SR) und einer weiteren Rohrelektrode (RE), die man isoliert in der Säule des Rasterelektronenmikroskops anordnet und mit einem hohen positiven Potential beaufschlagt. Da die Rohrelektrode (RE) bis in den Bereich des Polschuhspaltes der Objektivlinse (OL) hineinreicht, baut sich hier ein die Elektronen (PE) auf die gewünschte Endenergie abbremmendes elektrisches Feld auf. Aufgrund des dem fokussierenden Magnetfeld der Objektivlinse (OL) überlagerten Verzögerungsfeldes besitzt die Linse sehr kleine Farb- und Öffnungsfehlerkonstanten. Außerdem wird der Einfluß des Boersch-Effektes infolge der hohen mittleren kinetischen Energie der Primärelektronen in der Säule erheblich verringert.

FIG 3



EP 0 461 442 A2

Die Erfindung betrifft ein Teilchenstrahlgerät nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

In allen Bereichen der Entwicklung und Fertigung mikro- und optoelektronischer Bauelemente besteht ein steigender Bedarf an hochauflösenden Rasterelektronenmikroskopen, um Submikrometerstrukturen visuell beurteilen, Abweichungen von Sollmustern feststellen und topographische Parameter wie Höhen, Breiten oder Neigungswinkel erfassen und auswerten zu können. Konventionelle Rasterelektronenmikroskope erreichen die geforderte Ortsauflösung von Bruchteilen eines Mikrometers bis hin zu wenigen Nanometern allerdings erst bei kleinen Arbeitsabständen und hohen Beschleunigungsspannungen oberhalb von etwa 20 kV, wo Resiststrukturen und integrierte Schaltungen durch die hochenergetischen Elektronen geschädigt und nichtleitende oder schlechtleitende Proben aufgeladen werden.

Erst mit der Entwicklung aberrationsarmer Kondensor- und Objektivlinsen war die Möglichkeit gegeben, Rasterelektronenmikroskope und Elektronenstrahlmeßgeräte zu konstruieren, die auch bei niedrigen Strahlenergien im Bereich von etwa 0,5 bis 3 keV die für hochgenaue Messungen erforderliche Ortsauflösung erreichen. In den beispielsweise aus US-A 4 785 176, 4 831 266, 4 728 790 oder Microelectronic Engineering Vol. 7, Nr. 2 bis 4 (1987) Seiten 163 bis 172 bekannten Linsen nutzt man hierbei die Erkenntnis, daß ein dem fokussierenden Magnetfeld überlagertes elektrostatisches Verzögerungsfeld die Linsenaberrationen bei gleichem Arbeitsabstand erheblich verringert.

Neben den Linsenaberrationen begrenzt auch der sogenannte Boersch-Effekt die Ortsauflösung. In den US-A 4 713 543 und 4 675 524 wurde daher vorgeschlagen, die Elektronen im Strahlerzeuger auf eine hohe Energie von beispielsweise $E \geq 10$ keV zu beschleunigen, um sie erst unmittelbar oberhalb der Probe auf die gewünschte niedrige Endenergie von beispielsweise $E \leq 1$ keV abzubremesen.

Aus der US-A 4 896 036 ist ein Rasterelektronenmikroskop bekannt, in dem man die Aberrationen einer elektrostatischen Detektorobjektivlinse mit Hilfe eines aus mehreren Multipolelementen bestehenden Korrektors verringert.

Allen genannten Lösungsvorschlägen zur Verbesserung der Ortsauflösung erfordern eine Neukonstruktion der elektronenoptischen Säule oder zumindest eine erhebliche Modifikation der REM-Elektronik, so daß man diese fehlerarmen aber auch komplexen Linsensysteme in konventionellen Geräten nicht verwenden kann.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Teilchenstrahlgerät, insbesondere ein Rasterelektronenmikroskop, der eingangs genannten Art anzugeben, das auch bei niedrigen Strahlenergien eine hohe Ortsauflösung besitzt. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Teilchenstrahlgerät mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst.

Der mit der Erfindung erzielbare Vorteil besteht insbesondere darin, daß die Ortsauflösung eines konventionellen Rasterelektronenmikroskops bei niedrigen Strahlenergien und vergleichsweise großen Arbeitsabständen deutlich verbessert werden kann. Die Umrüstung für den Niederenergiebetrieb gestaltet sich sehr einfach, da man im wesentlichen nur eine zusätzliche Rohrelektrode, ein Hochspannungsnetzgerät sowie isolierende Halterungen zur Anordnung der Rohrelektrode in der Säule des Rasterelektronenmikroskops benötigt.

Die abhängigen Ansprüche betreffen vorteilhafte Weiterbildungen der im folgenden anhand der Zeichnungen näher erläuterten Erfindung. Hierbei zeigt

- Fig. 1 und 2 den schematischen Aufbau eines konventionellen und eines für niedrige Strahlenergien ausgelegten Rasterelektronenmikroskops
- Fig. 3 ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Rasterelektronenmikroskops
- Fig. 4 die elektrische Potentialverteilung innerhalb der Objektivlinse des erfindungsgemäßen Rasterelektronenmikroskops
- Fig. 5 die berechneten Elektronenbahnen $r_e(z)$ und $r_e^*(z)$ innerhalb einer rein magnetischen bzw. einer elektrostatischmagnetischen Objektivlinse. Beide Bahnen schneiden die optische Achse OA (z-Achse) in der Probenebene und besitzen dort dieselbe Steigung.

Wie die Fig. 1 schematisch zeigt, umfaßt ein konventionelles Rasterelektronenmikroskop üblicherweise einen Elektronenstrahlerzeuger Q, eine aus einer oder zwei Polschuhlinsen bestehende Kondensoreinheit KL und eine Objektivlinse OL, die das von der Kondensoreinheit KL erzeugte Zwischenbild ZB der virtuellen Elektronenquelle verkleinert auf die Probe PR abbildet. Ferner enthält die elektronenoptische Säule noch ein Strahlaustastsystem BBS, eine Ablenkeinheit AS zur Positionierung des Elektronenstrahls auf der Probe PR sowie einen der Korrektur des Astigmatismus dienenden Stigmator ST. Die nicht dargestellten Detektoren zum Nachweis der auf der Probe PR ausgelösten Sekundärelektronen und der von der Probe PR rückgestreuten Primärelektronen ordnet man üblicherweise seitlich unterhalb bzw. oberhalb der Objektivlinse OL an.

Als Objektivlinse OL findet eine unsymmetrische Magnetlinse Verwendung, deren Polschuhe den von der Erregerspule erzeugten magnetischen Fluß auf einen kleinen Raumbereich um die optische Achse OA

(z-Achse) konzentrieren, wobei das um diese Achse OA rotationssymmetrische Magnetfeld im Polschuhspalt seine maximale Stärke erreicht.

Da sowohl die Probe PR als auch die Objektivlinse OL, die Kondensoreinheit KL, die Anode A und das bis in die Kondensoreinheit KL hineinreichende Strahlführungsrohr SR auf Masse liegen, werden die Elektronen PE bereits im Strahlerzeuger Q auf die gewünschte Endenergie $E = e U_1$ beschleunigt (s. den unteren Teil der Fig. 1, die den gerätemassebezogenen Potentialverlauf $V(z)$ auf der Strahlachse und die Lage der Kathode K, der Anode A und der Probe PR zeigt). Hierbei bezeichnet e die Elementarladung und U_1 die zwischen Kathode K und Anode A aufgebaute Potentialdifferenz.

Die dem Strahldurchmesser d auf der Probe PR proportionale Ortsauflösung wird bei niedrigen Beschleunigungsspannungen $U_1 \leq 3$ kV im wesentlichen von der der Fokussierung entgegenwirkenden Elektron-Elektron-Wechselwirkung (Boersch-Effekt) und dem axialen Farbfehler der Objektivlinse OL begrenzt. Der Strahldurchmesser d berechnet sich hierbei näherungsweise zu

$$d = (d_C^2 + d_F^2)^{1/2} \quad (1)$$

wobei d_C den um die Coulomb-Abstoßung der Elektronen im Strahlengang zwischen Kathode K und Probe PR (lateral Boersch-Effekt) erweiterten geometrisch-optischen Sondendurchmesser und d_F den Durchmesser des durch den Farbfehler der Objektivlinse OL erzeugten Fehlerscheibchens bezeichnet. Wie aus Gleichung 2) ersichtlich, hängt die Größe d_F von der Strahlapertur α , dem Farbfehlerkoeffizienten C_F der Objektivlinse OL, der Elektronenenergie $E = e U_1$ und der Breite $e\Delta U$ der Energieverteilung der Elektronen ab.

$$d_F = C_F \alpha \Delta U / U_1 \quad (2)$$

Da die Farbfehlerkonstante C_F der Brennweite f der Linse proportional ist, läßt sich der Strahldurchmesser d und damit die Ortsauflösung durch eine Verringerung der Brennweite verbessern. Dem sind allerdings enge Grenzen gesetzt, da man die Probe PR dann sehr nahe unterhalb der Objektivlinse OL, d. h. in deren Magnetfeld anordnen muß. Außerdem können größere Proben dann nicht mehr im geneigten Zustand abgetastet werden. Eine weitere Verbesserung der Ortsauflösung ist daher nur durch eine Verringerung des Boersch-Effektes (Unterdrückung des die Energiebreite $e\Delta U$ beeinflussenden energetischen Boersch-Effektes und des eine Aufweitung des Strahls bewirkenden lateralen Boersch-Effektes) und der Aberrationen des abbildenden Systems möglich.

In dem in Fig. 2 dargestellten Rasterelektronenmikroskop wird diesen Erfordernissen dadurch Rechnung getragen, daß man die Anode A mit einem bezüglich Masse hohen positiven Potential beaufschlagt und das mit der Anode A leitend verbundene Strahlführungsrohr SR bis in den Bereich des Polschuhspaltes der Objektivlinse OL verlängert. Da die Elektronen nahezu die gesamte Säule des Rasterelektronenmikroskops mit einer hohen Energie $E = e (U_1 + U_2)$ von beispielsweise $E = 10$ keV durchlaufen und erst innerhalb der Objektivlinse OL in dem zwischen dem Strahlführungsrohr SR und dem auf Masse liegenden unteren Polschuh aufgebauten elektrischen Feld auf die gewünschte Endenergie von beispielsweise $E = e U_1 = 1$ keV abgebremst werden, verringert sich der Einfluß des Boersch-Effektes erheblich. Außerdem besitzt die Objektivlinse aufgrund des dem fokussierenden Magnetfeld überlagerten elektrischen Verzögerungsfelds deutlich kleinere Farb- und Öffnungsfehlerkonstanten als die rein magnetische Objektivlinse des Rasterelektronenmikroskops nach Fig. 1. Die unterhalb der Objektivlinse OL angeordnete und ebenfalls auf Masse liegende Elektrode AE dient der Abschirmung der Probe PR.

Da das Strahlführungsrohr SR auf Hochspannung U_2 liegt (s. den unteren Teil der Fig. 2, die ebenfalls den gerätemassebezogenen Potentialverlauf $V(z)$ bzw. kathodebezogenen Potentialverlauf $\Phi(z)$ auf der Strahlachse und die Lage des Strahlrohrendes zeigt), sind in diesem Rasterelektronenmikroskop erhebliche Modifikationen der REM-Elektronik, insbesondere der Komponenten zur Ansteuerung des ebenfalls mit dem Beschleunigungspotential beaufschlagten Strahlaustastsystem, erforderlich.

Zur Verbesserung der Ortsauflösung eines konventionellen Rasterelektronenmikroskops bei niedrigen Energien $E \leq 3$ keV wird erfindungsgemäß vorgeschlagen, eine elektrostatische Immersionslinse am Ort des von der Kondensoreinheit KL erzeugten Zwischenbildes ZB anzuordnen. Die Lage dieses letzten Zwischenbildes ZB vor der Objektivlinse OL wird in einem konventionellen Rasterelektronenmikroskop mit Doppelkondensor üblicherweise festgehalten. Wie in Fig. 3 schematisch dargestellt, besteht die der Beschleunigung der Primärelektronen PE dienende Immersionslinse aus dem bereits vorhandenen und gegebenenfalls

verlängernden oder gekürzten Strahlführungsrohr SR sowie einer zusätzlichen Rohrelektrode RE, die man in der Säule isoliert anordnet und mit einem positiven Potential von beispielsweise $U_2 = 10$ kV beaufschlagt. Zusätzliche Aberrationen werden durch das zwischen den Rohrenden der Elektroden SR und RE aufgebauten Beschleunigungsfeld nicht verursacht, da man dessen Linsenwirkung optisch eliminiert (das Zwischenbild ZB liegt in der Immersionslinse). Wie der untere Teil der Fig. 3 zeigt, laufen die Elektronen PE in der Säule mit einer vergleichsweise hohen mittleren kinetischen Energie, wodurch sich der Einfluß des Boersch-Effektes auf den Sondendurchmesser entsprechend vermindert. Außerdem besitzt die Objektivlinse OL aufgrund des dem fokussierenden Magnetfeld überlagerten elektrostatischen Verzögerungsfeldes sehr kleine Farb- und Öffnungsfehlerkonstanten. Das Verzögerungsfeld erzeugt man hierbei mit Hilfe der aus der Rohrelektrode RE und dem auf Masse liegenden unteren Polschuh PE gebildeten Immersionslinse (s. Fig. 4). Unterhalb der Objektivlinse OL ist wiederum eine Abschirmelektrode AE vorgesehen, um den Durchtritt des in Fig. 4 durch Potentiallinien PL angedeuteten Verzögerungsfeldes auf die Probe PR zu verhindern.

Wie die in Fig. 5 dargestellten Ergebnisse einer Simulationsrechnungen zeigen, verläuft die axiale Elektronenbahn $r_a(z)$ (durchgezogene Linie) in einer rein magnetischen Feld $B(z)$ (punktierte Linie) erzeugenden Objektivlinse sehr weit außerhalb der optischen Achse, während die von derselben Zwischenbildlage ausgehenden Elektronen die elektrostatischmagnetische Linse im achsennahen Bereich durchsetzen (strichpunktierte Linie $r_a^*(z)$). Demzufolge sind auch die Farb- und Öffnungsfehlerkonstanten des letztgenannten Linsentyps entsprechend kleiner, da diese sich jeweils aus Integralen über Polynome von $r_a^*(z)$ und deren Ableitungen vom Grade 2 und 4 berechnen. Anhand der Fig. 5 ist auch zu erkennen, daß die Fokussierung der Elektronen im elektrostatisch-magnetischen Feld ($B(z) \neq 0$, $\partial\Phi(z)/\partial z \neq 0$, $\Phi(z) = V(z) + U_1$) komplizierter verläuft als im rein magnetischen Feld ($B(z) \neq 0$, $\partial\Phi(z)/\partial z = 0$). Da die das Verzögerungsfeld erzeugende Immersionslinse sich ersatzweise in eine zerstreuernde und eine fokussierende Komponente unterteilen läßt und man diese vorzugsweise im Strahlengang hinter der magnetischen Linse anordnet, werden die Elektronen im magnetischen Feld zuerst in Richtung der optischen Achse (z-Achse) abgelenkt, in der zerstreuernden Komponente leicht von der Achse weggebrochen um anschließend mit Hilfe der konvergenten Komponente auf die Achse fokussiert zu werden. Bei gleicher Steigung $\partial r_a(z)/\partial z$ bzw. $\partial r_a^*(z)/\partial z$ in der Ebene der Probe PR ist die Größe $r_a^*(z)$ stets kleiner als $r_a(z)$ in der rein magnetischen Linse, so daß auch die Aberrationsintegrale für die Farb- und Öffnungsfehlerkonstante entsprechend kleiner werden.

Die Erfindung ist selbstverständlich nicht auf die beschriebenen Ausführungsbeispiele begrenzt. So ist es ohne weiteres möglich, die aus einer oberen und einer unteren Rohrelektrode bestehende Immersionslinse auch in einem anderen Teilchenstrahlgerät, insbesondere in einem Ionenstrahlgerät zur Beschleunigung der Teilchen von einer ersten auf eine höhere zweite Energie zu verwenden.

35 Patentansprüche

1. Teilchenstrahlgerät mit einem Teilchenstrahlerzeuger (Q), einem ersten Linsensystem (KL) zur Bündelung des Teilchenstrahls und einem zweiten Linsensystem (OL) zur Abbildung eines vom ersten Linsensystem (KL) erzeugten Zwischenbildes (ZB) auf eine Probe (PR),
dadurch gekennzeichnet,
daß im Zwischenbild (ZB) Mittel (SR, RE) zur Beschleunigung der Teilchen (PE) von einer ersten auf eine höhere zweite Energie angeordnet sind.
2. Teilchenstrahlgerät nach Anspruch 1,
gekennzeichnet durch
eine erste Immersionslinse (SR, RE) als Mittel zur Beschleunigung der Teilchen (PE).
3. Teilchenstrahlgerät nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet,
daß die erste Immersionslinse eine obere und eine untere Elektrode (SR, RE) aufweist, wobei die obere Elektrode (SR) auf dem Potential einer Anode (A) des Teilchenstrahlerzeugers (Q) liegt.
4. Teilchenstrahlgerät nach Anspruch 3,
dadurch gekennzeichnet,
daß die obere und die untere Elektrode (SR, RE) jeweils die Form eines konzentrisch zur Strahlachse (OA) des ersten und zweiten Linsensystems (KL, OL) angeordneten Hohlzylinders aufweisen.
5. Teilchenstrahlgerät nach Anspruch 3 oder 4,

gekennzeichnet durch

ein mit der Anode (A) verbundenes Strahlführungsrohr (SR) als obere Elektrode der ersten Immersionslinse.

- 5 6. Teilchenstrahlgerät nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
 dadurch gekennzeichnet,
 daß das zweite Linsensystem eine ein die Teilchen (PE) fokussierendes Magnetfeld erzeugende
 Objektivlinse (OL) und eine zweite Immersionslinse (RE, UP) aufweist, wobei die zweite Immersionslin-
 se (RE, UP) derart angeordnet ist, daß sich deren elektrisches Verzögerungsfeld dem fokussierenden
 Magnetfeld überlagert.
- 10 7. Teilchenstrahlgerät nach einem der Ansprüche 3 bis 6,
 dadurch gekennzeichnet,
 daß eine obere Elektrode der zweiten Immersionslinse auf dem Potential der unteren Elektrode (RE)
 der ersten Immersionslinse liegt.
- 15 8. Teilchenstrahlgerät nach einem der Ansprüche 3 bis 7,
 dadurch gekennzeichnet,
 daß die obere Elektrode (RE) der zweiten Immersionslinse die Form eines in die Objektivlinse (OL)
 hineinragenden Hohlzylinders aufweist.
- 20 9. Teilchenstrahlgerät nach einem der Ansprüche 3 bis 8,
 dadurch gekennzeichnet,
 daß die untere Elektrode der ersten Immersionslinse (SR, RE) identisch ist mit der oberen Elektrode
 der zweiten Immersionslinse (RE, UP).
- 25 10. Teilchenstrahlgerät nach einem der Ansprüche 1 bis 9,
 gekennzeichnet durch
 Mittel (AS) zur Ablenkung des Teilchenstrahls auf der Probe (PR).
- 30 11. Teilchenstrahlgerät nach einem der Ansprüche 1 bis 10,
 gekennzeichnet durch
 Mittel (BBS) zur Modulation der Intensität des Teilchenstrahls.
- 35 12. Teilchenstrahlgerät nach einem der Ansprüche 1 bis 11,
 gekennzeichnet durch
 Mittel zum Nachweis der auf der Probe (PR) ausgelösten oder von der Probe (PR) rückgestreuten
 Sekundärteilchen.
- 40 13. Teilchenstrahlgerät nach einem der Ansprüche 1 bis 12,
 dadurch gekennzeichnet,
 daß das erste Linsensystem eine oder zwei Kondensorlinsen (KL) aufweist.
- 45 14. Teilchenstrahlgerät nach einem der Ansprüche 1 bis 13,
 dadurch gekennzeichnet,
 daß die Mittel (SR, RE) zur Beschleunigung der Teilchen (PE) im letzten Zwischenbild (ZB) vor der
 Objektivlinse (OL) angeordnet sind.

50

55

FIG 1

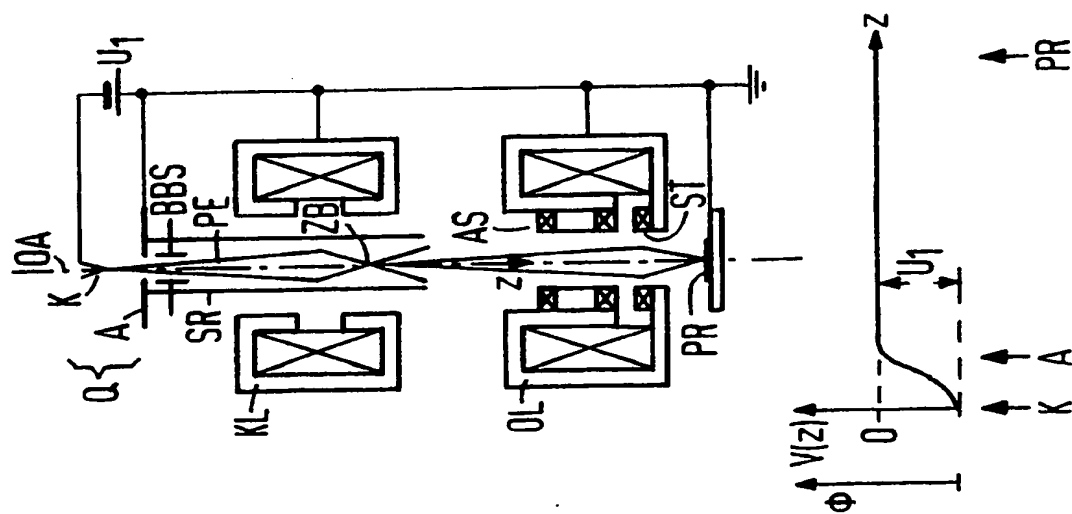


FIG 2

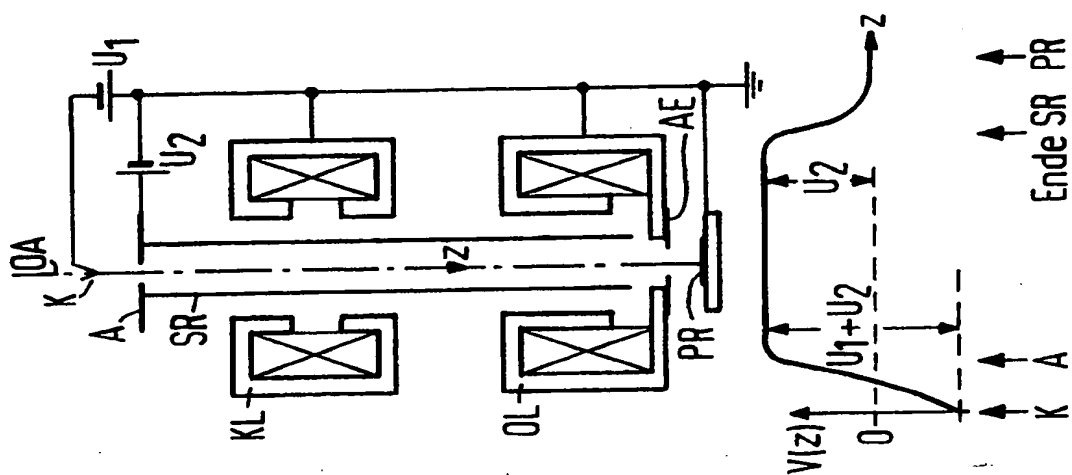


FIG 3

